

Introducción a Física de Partículas y Cosmología

del siglo XX

Parte 2/4

Fernando Marchesano
CERN

(agradecimientos a Rolf Landua
y Ángel Uranga por material original)

Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

e^+

n

μ^-

τ^-

p^+

ν_e

ν_μ

τ^-

ν_s

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Drac
Antimateria

QED

Higgs

Gran unificación?

Supersimetría?

Supercuerdas?

3 familias

W

Z

θ

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

Violación de P, C, CP

Bosones W
Unificación electrodébil

Color
QCD

3 familias

Radio-actividad

Fotón

Rayos cósmicos

Galaxias ; Universo en expansión;
modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

Fondo de radiación de microondas

Inflación

Inhomogeneidades del fondo de microondas

Energía oscura

Relatividad General

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Cámara de hilos

Ordenadores online

Detectores modernos

Aceleradores e^+e^-

Enfriamiento de haces

Aceleradores p^+p^-

WWW

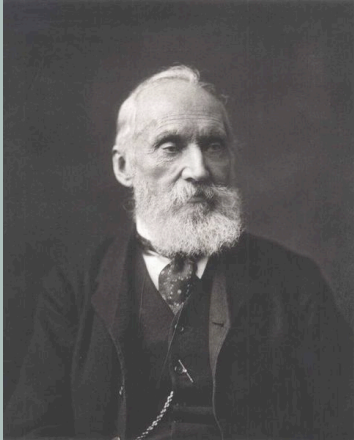
GRID

Zoo de partículas

MODELO ESTÁNDAR



Recordemos los albores del s. XX



**William Thomson
(Lord Kelvin)**



Las dos nubes en el horizonte que vislumbró Lord Kelvin desencadenaron dos enriquecedores **chaparrones** que hicieron florecer la Física del s. XX

- La radiación de cuerpo negro

⇒ **Mecánica Cuántica**

- El experimento de Michelson-Morley

⇒ **Teoría de la Relatividad**

Nueva visión del espacio y el tiempo

- Relatividad Especial
**y las interacciones
fundamentales**

- Relatividad General
Descripción del Universo
Gravedad y Cosmología

Einstein: Relatividad Especial



Fruto de la paradójica unión de dos grandes principios

* Principio de relatividad de Galileo: Diferentes sistemas de referencia inerciales son equivalentes (mismas leyes de la Mecánica)

* Electromagnetismo de Maxwell: la luz se propaga con una velocidad determinada ($c = 300000 \text{ km/s}$)

¿Cómo es posible que la velocidad de la luz sea la misma para cualquier observador inercial?

(experimento de Michelson-Morley)

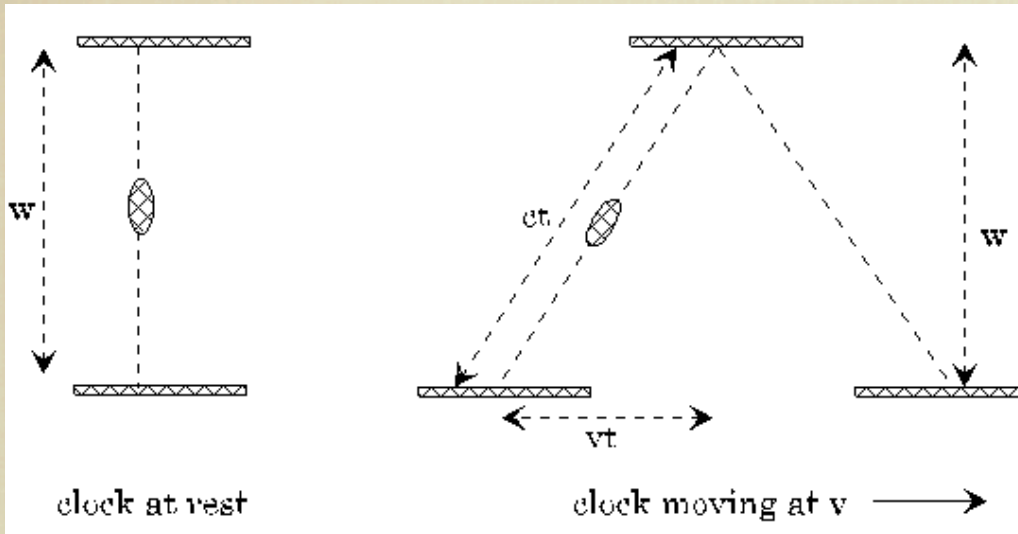
Sus postulados:

- 1) Velocidad de la luz = constante;
- 2) Equivalencia de **todas** las leyes físicas en todos los sistemas inerciales

Sus conclusiones:

Dado que $c = \text{const}$, y velocidad = (espacio/tiempo) \Rightarrow

\Rightarrow ¡El espacio y el tiempo no son absolutos!



$$c^2 t^2 = v^2 t^2 + w^2$$

$$t^2 (c^2 - v^2) = w^2$$

$$t = \frac{w/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \tau$$

1) Dilatación del tiempo, contracción del espacio

2) Modificación de las leyes de Newton, aumento relativista de la masa

⇒ ¡Velocidad de la luz como velocidad límite!

⇒ ¡La masa y la energía son conceptos intercambiables!

$$E = mc^2$$



P.A.M. Dirac

La ecuación de Dirac generaliza la de Schrödinger (p.e. electrón) al régimen relativista
Unificación de relatividad y mecánica cuántica

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Compárese con la ecuación de Schrödinger (no-relativista)

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$

$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

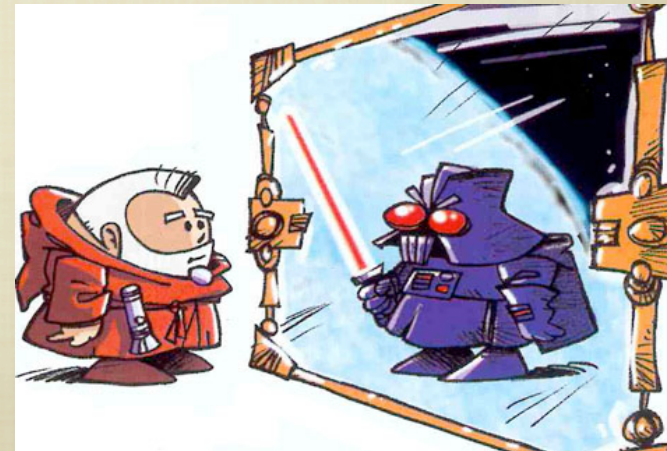
Observación matemática: la generalización sólo existe si la partícula tiene cuatro grados de libertad

Interpretación física:

- Dos estados de spin
- Dos estados corresponden a una partícula con igual masa y carga opuesta: **antipartícula**



¡Predicción de la existencia de antipartículas!



e^+



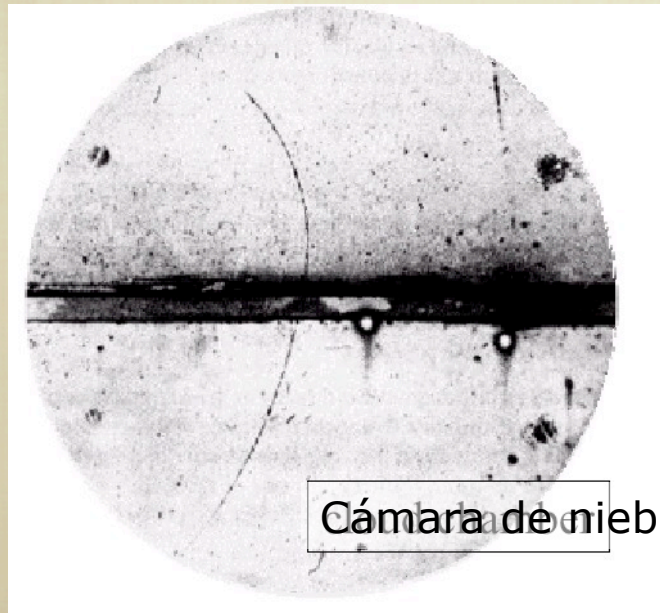
C. Anderson

Descubrimiento del positrón
(antipartícula del electrón)

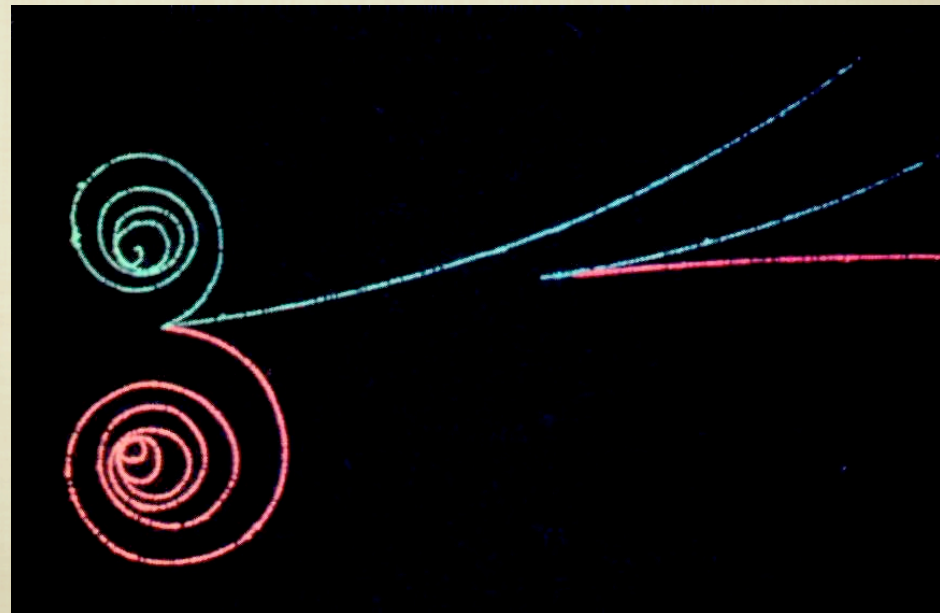
¡Dirac tenía razón!



**Descubrimiento experimental
de la antimateria**



Cámara de niebla





Electrodinámica Cuántica (QED)

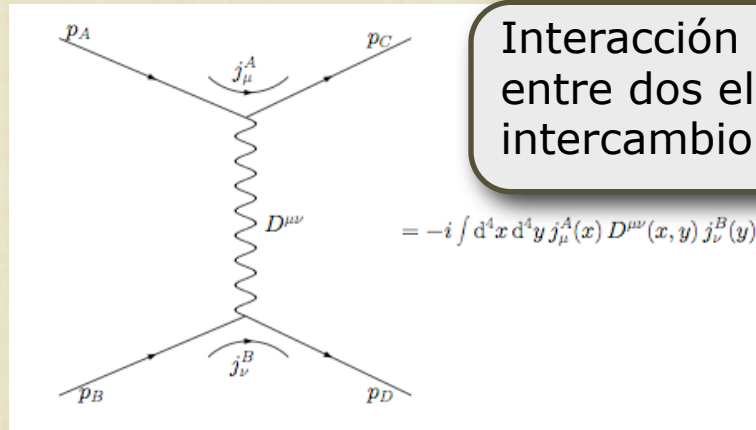


R. P. Feynman

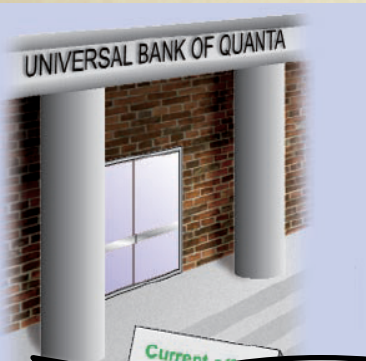
Feynman, Tomonaga, Schwinger; Dyson
Describe interacciones electromagnéticas entre electrones, positrones y fotones, de forma cuántica y relativista

Diagramas de Feynman

Cálculo de amplitudes cuánticas mediante gráficos intuitivos



Interacción electromagnética entre dos electrones: intercambio de fotones (virtuales)



Banco Cuántico: ¡Oferta!
Tome prestado ΔE por un tiempo $\Delta t = \hbar / \Delta E$

Concepto de **partícula virtual**, que aparece y desaparece en el proceso.

Su energía puede ser arbitrariamente alta, compatible con el principio de incertidumbre (vive un tiempo muy corto)

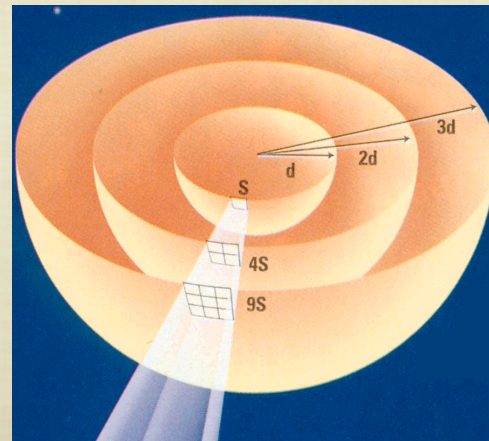
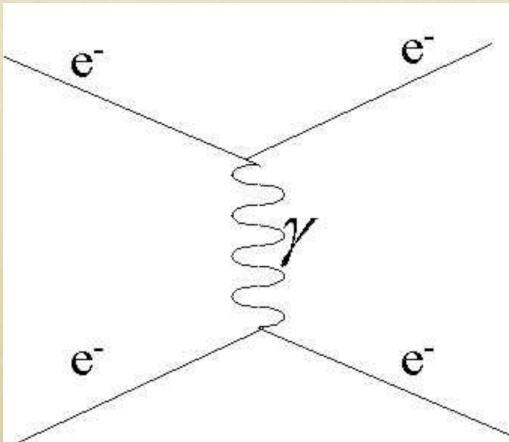
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Efectos reales de las partículas virtuales

La interacción electromagnética entre partículas cargadas se origina por intercambio de fotones (virtuales)

Las cargas eléctricas emiten y absorben continuamente fotones virtuales
(la nube de fotones virtuales es el campo electromagnético)

La dependencia $1/r^2$ en la ley de Coulomb describe la probabilidad de que uno de esos fotones sea absorbido por otra partícula cargada a una distancia r

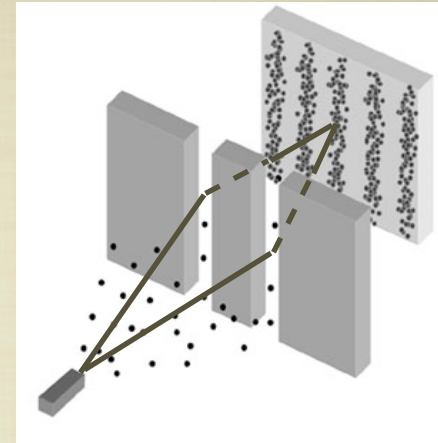
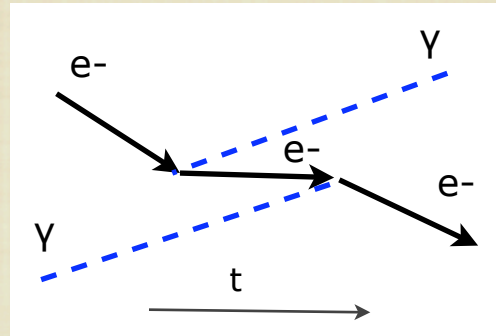
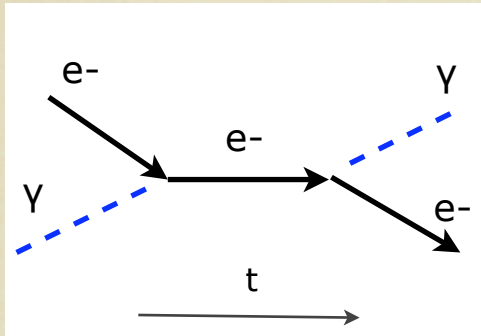


ley $1/r^2$

Los diagramas codifican las propiedades cuánticas y relativistas

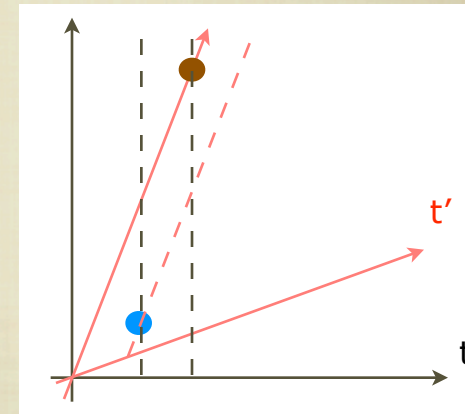
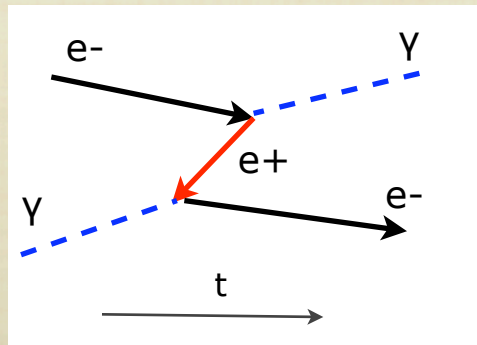
- **Cuánticas:** Amplitud de probabilidad de un proceso = suma sobre posibles maneras en que puede ocurrir (generalización del experimento de doble rendija)

Ej: Efecto Compton



- **Relativistas:** Relatividad de la simultaneidad: Orden temporal de eventos puede depender del observador. Necesario sumar sobre diferentes ordenamientos temporales

Antipartículas = partículas viajando hacia atrás en el tiempo!

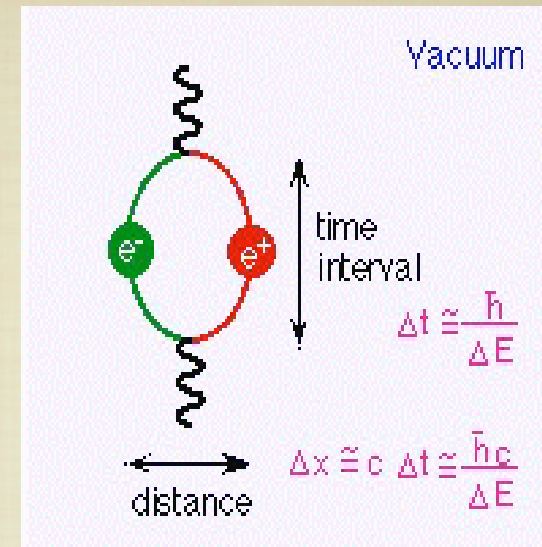


Antipartículas: consecuencia de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad

¡El vacío se convierte en un concepto complicado!

En la Física Cuántica los cuantos de los campos no pueden estar en reposo completo (principio de incertidumbre)

Por ejemplo, el estado de mínima energía del campo electromagnético (el vacío) puede producir pares virtuales electrón-positrón: **FLUCTUACIONES DEL VACÍO**



La electrodinámica cuántica reproduce los resultados conocidos y permite el cálculo de nuevos efectos (originados por las partículas virtuales) **¡en perfecto acuerdo con las medidas experimentales!**

La Teoría Cuántica de Campos y los diagramas de Feynman se convierten en el lenguaje natural para describir todas las interacciones.

Volvamos a los albores del s. XX

A principios del s.XX, se habían descubierto una serie de fenómenos sin explicación conocida

1895: Wilhelm Röntgen descubrió los "rayos X"
(hoy, fotones de alta energía, similar rayos γ)

1896: Henri Becquerel detectó radiación de cristales de uranio
(radiación alfa, posteriormente entendida como núcleos de helio)

1898: Marie y Pierre Curie : radiación ionizante de uranio + polonio)
(radiación beta, posteriormente entendida como electrones/positrones)

Radioactividad

Más adelante se comprendió que están asociados a nuevas interacciones

La "interacción débil"

Desintegración beta

La "interacción fuerte"

Fuerzas entre protones y neutrones
Desintegración alfa y rayos gamma

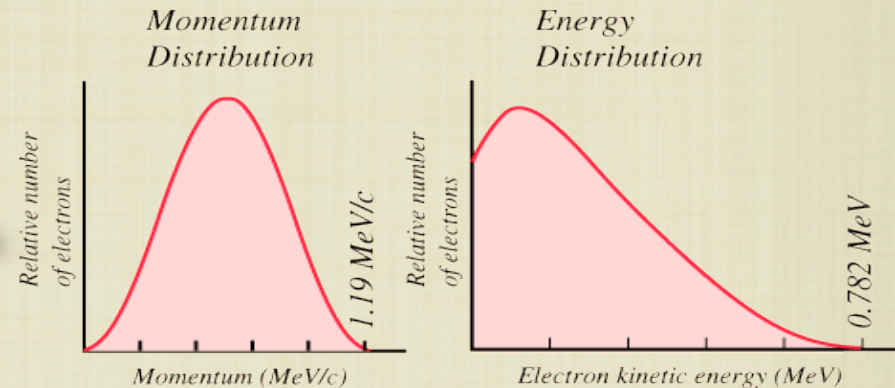
Desintegración beta de núcleos: emisión de electrones

Nuevo tipo de interacción, $n \rightarrow p + e$, denominado débil


En una desintegración de una partícula en dos, la conservación de energía y momento determinan la energía de las partículas resultantes. Sin embargo los datos muestran que el espectro de energías de los electrones es continuo!



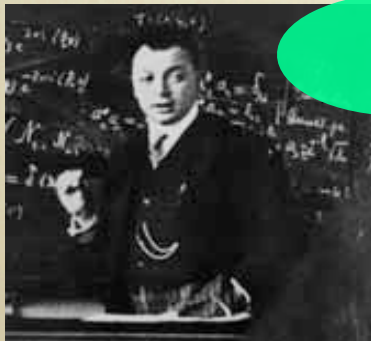
L. Meitner, O. Hahn



¿Violación de la conservación de la energía?

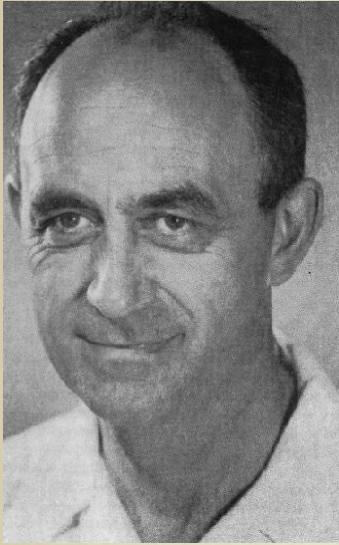
¡NO! Una nueva partícula: **el neutrino** 

En 1930 Wolfgang Pauli propuso la emisión simultánea de una partícula neutra extremadamente ligera (bautizada como **neutrino** por Fermi en 1931)



W. Pauli

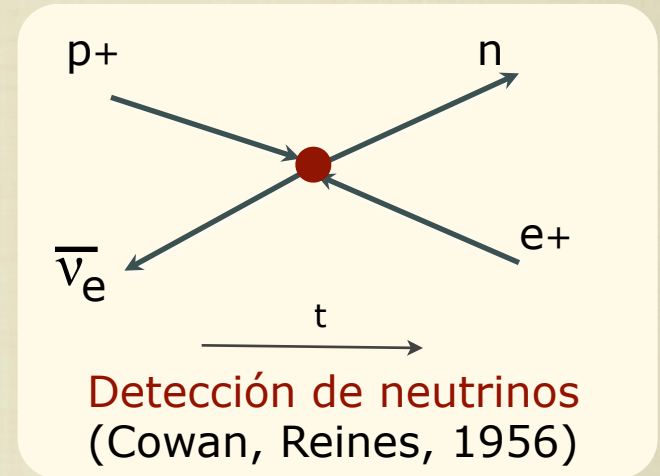
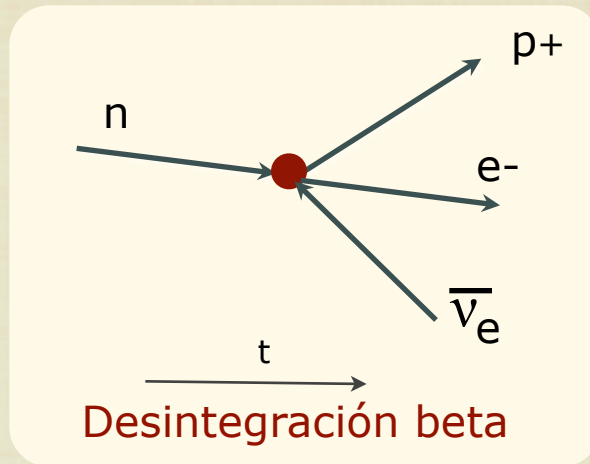




E. Fermi

Propone un modelo de la interacción débil
 Interacción con intensidad $G_F \sim 10^{-5}$ comparada con la electromagnética

En el lenguaje de diagramas de Feynman



La interacción débil cambia la naturaleza de las partículas.
 Es más apropiado denominarla "interacción" que "fuerza"

Interacción local entre "corrientes" (protón-neutrón / electrón-neutrino) sin intermediarios

Patológica a altas energías ~ 100 GeV, Ok hasta ~ 1960

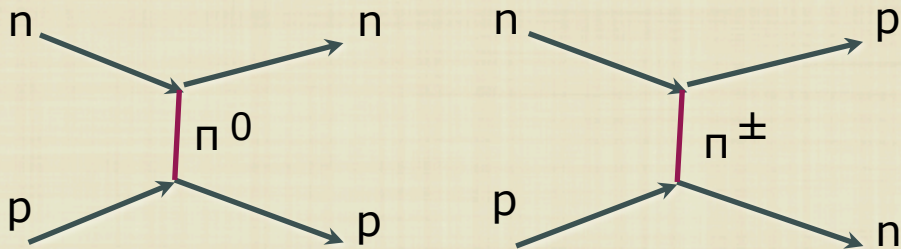
La analogía con electromagnetismo se hará mucho más concreta más adelante (partículas mediadoras Z/W)

Interacción fuerte: mantiene unidos los protones y neutrones en el núcleo



H. Yukawa

Modelo de Yukawa: analogía con electromagnetismo
Intercambio de partículas, denominadas **pión**



Partículas masivas ⇒
⇒ **interacción de corto alcance**

Compatible con el principio de incertidumbre: 1.4 fm ~ 140 MeV

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Análogo de la ley de Coulomb

Interacción atractiva

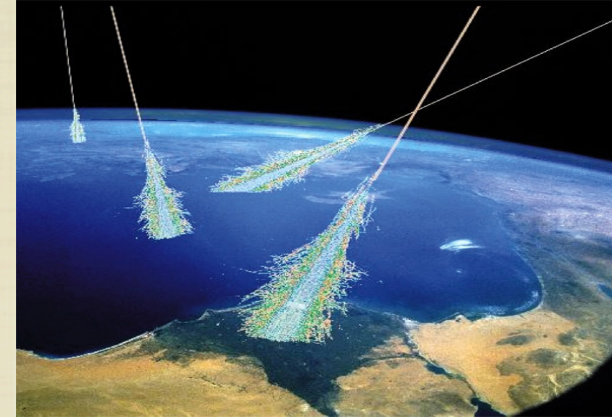


Banco Cuántico: ¡Oferta!
Tome prestados 140MeV durante 10⁻²³ s.

μ^-

Tras la predicción de Yukawa del pión, comenzó una intensa búsqueda de esta partícula (100-200 MeV)

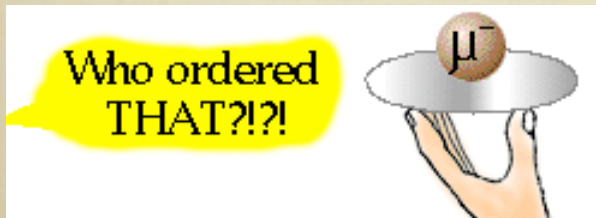
Aún no existían aceleradores con suficiente energía.
Se intentó detectarlos en los rayos cósmicos (descubiertos en 1913)
Los físicos subían a montañas o en globo a buscar trazas en emulsiones fotográficas



En 1937 C. Anderson descubrió una partícula en el rango de masas esperado

¡Pero era capaz de atravesar grandes espesores de material!
Es decir, no sentía las interacciones fuertes con los núcleos presentes en el material

¡No se trataba del pión de Yukawa!



Muón - "electrón pesado" (206 x m_e)

I. Rabi:

"¿Quién ha encargado eso?"

"Who ordered that?"

π



Descubrimiento del pión (cargado)

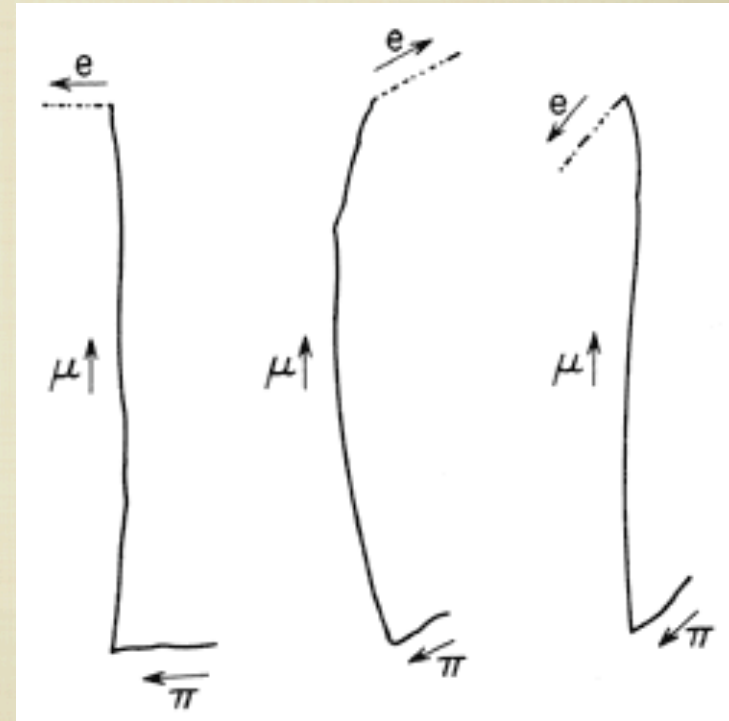
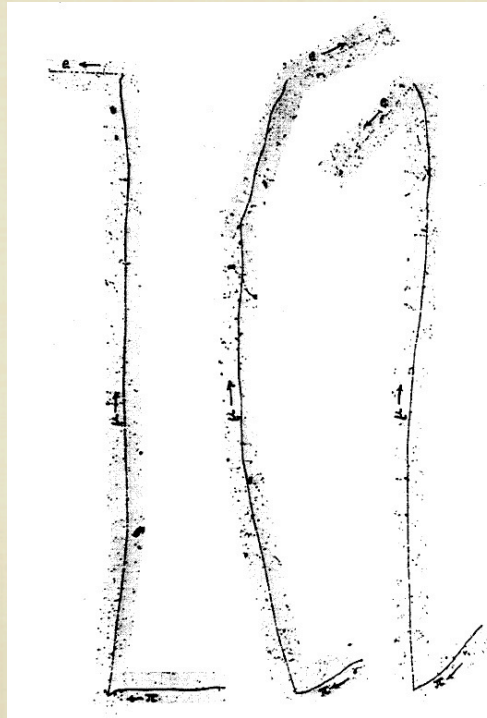
Confirma la explicación de Yukawa de la interacción entre protones/neutrones

Trazas en emulsiones fotográficas tomadas en el Pic du Midi, Pirineos



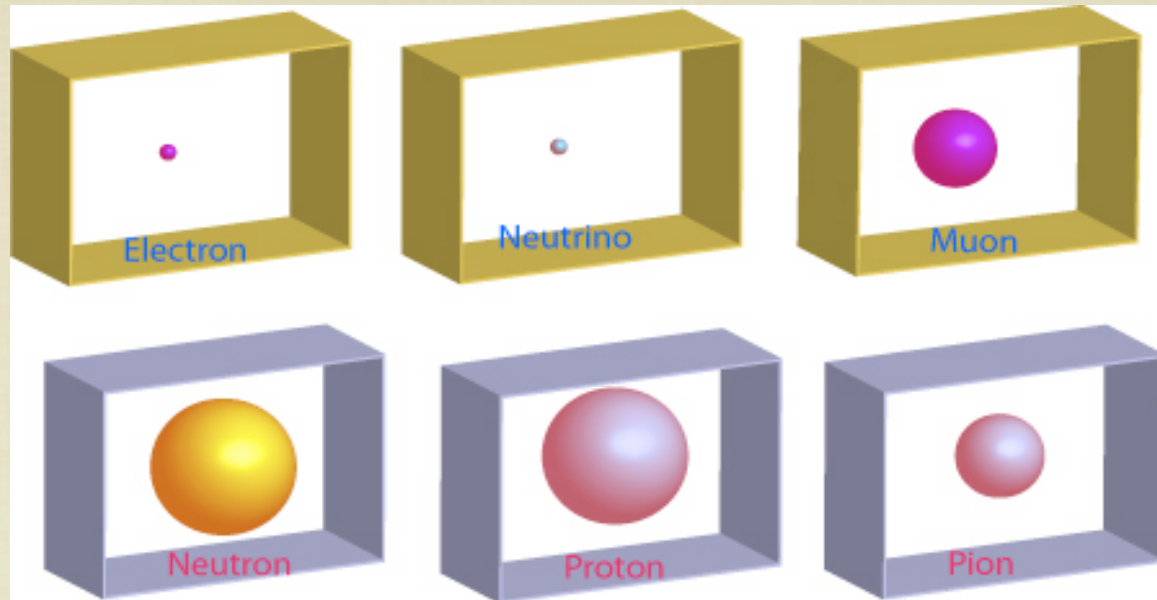
Scanned at the American Institute of Physics

C. Powell



Un año más tarde, se producen piones en el ciclotrón de Berkeley, California
Comienzo de la era de los aceleradores.

- Lista de partículas elementales (aprox. 1948)



- Interacciones electromagnética (fotón),
débil (teoría de Fermi), y fuerte (pión)

- Descripción cuántica y relativista de partículas e interacciones

¿Y la interacción gravitacional?

No muy relevante en Física de Partículas, pero sí en la
estructura y evolución del Universo (Cosmología)

Cosmología antes del s. XX

Antes s. XX: - Gravitación Newtoniana

- Universo infinito en el espacio y eterno en el tiempo

Sin embargo, esto último es incompatible con un hecho familiar:

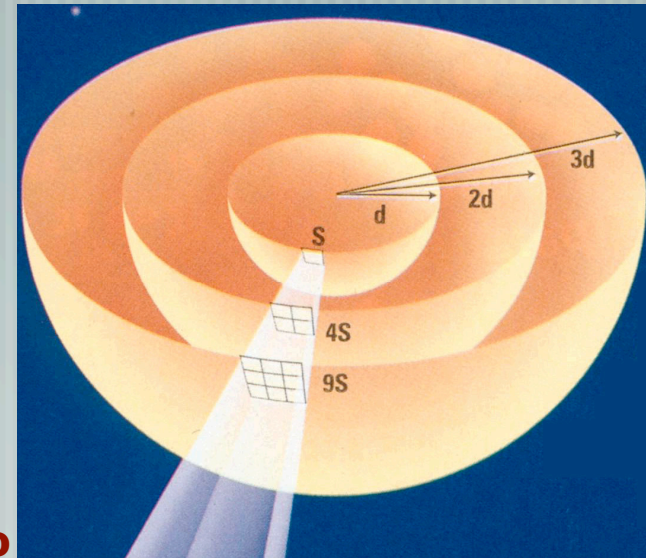
¡La noche es oscura!

La paradoja de Olbers (1823)

Supongamos el Universo infinito, eterno, y uniformemente poblado de estrellas. Entonces se obtiene un cielo infinitamente iluminado.

Demostración:

- Divídase el espacio en un número infinito de "capas de cebolla"
- Una estrella en la capa a distancia r tiene luminosidad $\sim 1/r^2$, pero el número de estrellas crece como $\sim r^2$
- Cada una de las infinitas capas contribuye con la misma cantidad



Solución: Universo finito en el espacio y/o tiempo

Requirió cambio radical en la concepción del espacio-tiempo y la gravedad

Teoría de la Relatividad General

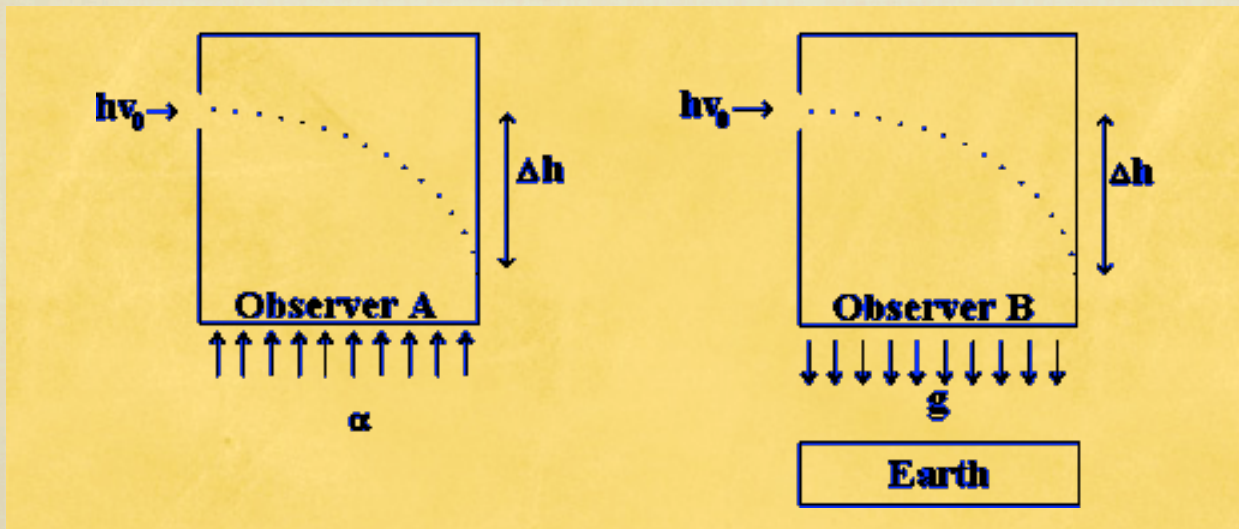
La gravitación Newtoniana es una acción instantánea a distancia
Incompatible con la teoría de la relatividad



Relatividad General (Einstein): leyes físicas para observadores en sistemas de referencia no inerciales (acelerados)

⇒ Principio de equivalencia

Una aceleración es indistinguible de un campo gravitacional
(equivalencia de masa inercial y masa gravitatoria)



“El pensamiento más feliz de mi vida”

“The happiest thought of my life” (A. Einstein)

Relatividad General y Gravitación

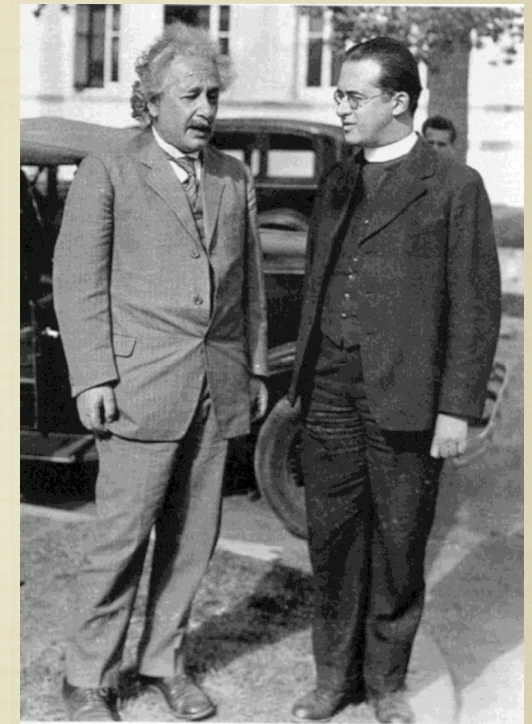
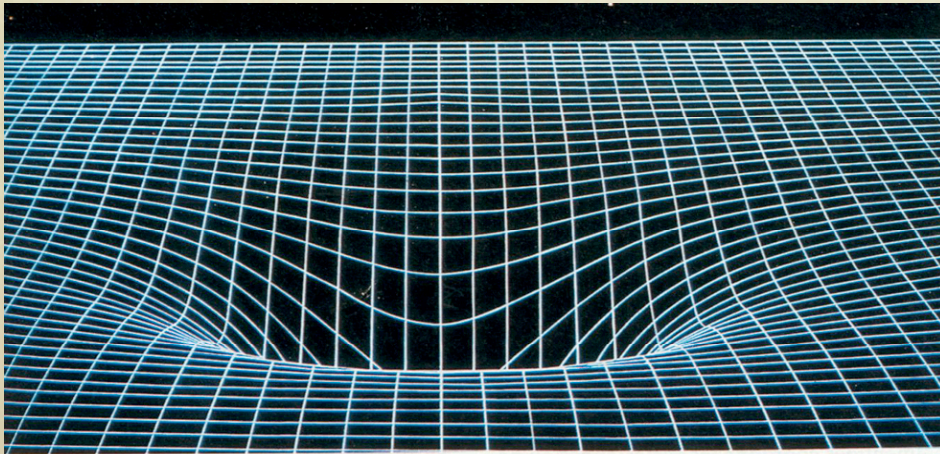
Los rayos de luz definen el camino más corto en el espacio

- Ascensor acelerado: la luz sigue trayectorias parabólicas
- Campo gravitatorio: los rayos de luz deben curvarse!

¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!

Ecuaciones de Einstein:

- La Materia dicta al Espacio cómo curvarse
- El Espacio dicta a la Materia cómo moverse



A. Einstein y G. Lemaître

Aplicación a Universo dinámico y en evolución

A. Friedmann (1922), G. Lemaître (1927)

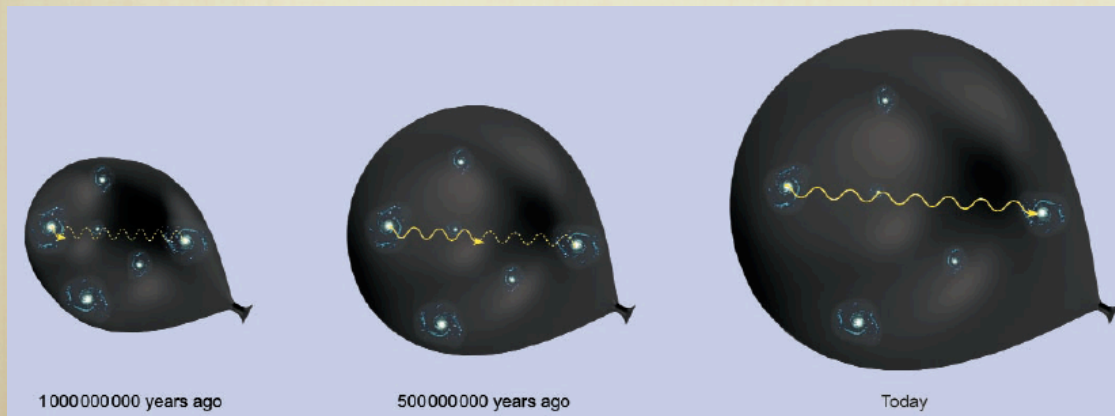
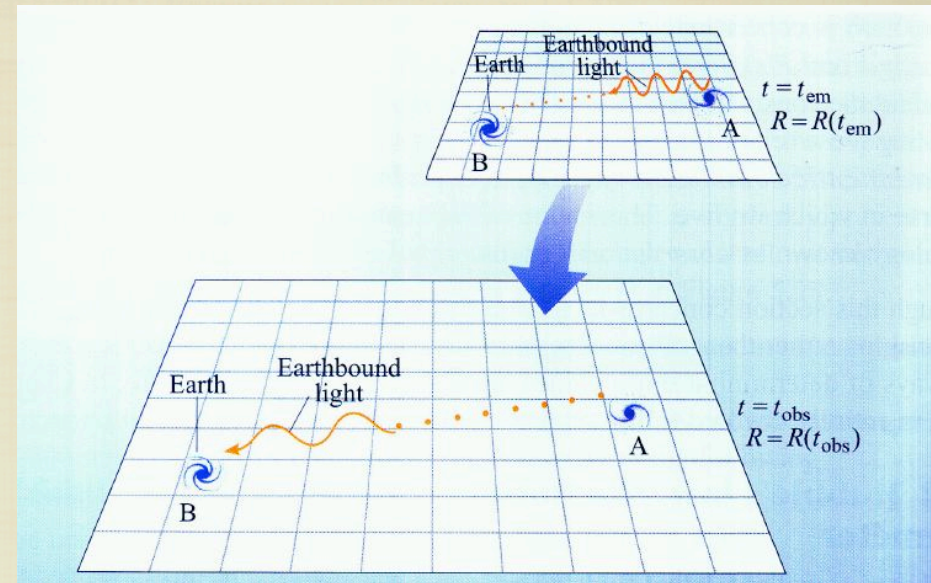
Friedmann propuso una solución de las ecuaciones de Einstein para la evolución del Universo entero

Universo aproximadamente homogéneo.
Su evolución se describe mediante el **factor de escala $a(t)$**

$$r_{AB}(t) = a(t) x_{AB}$$

Las ecuaciones de Friedmann relacionan la densidad promedio " ρ " y el factor de curvatura espacial " K " con el ritmo de expansión

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$



Densidad crítica

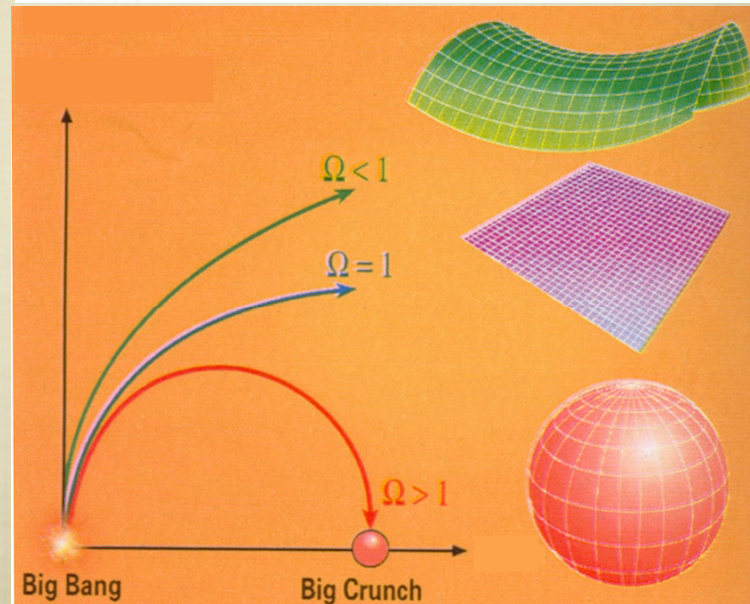
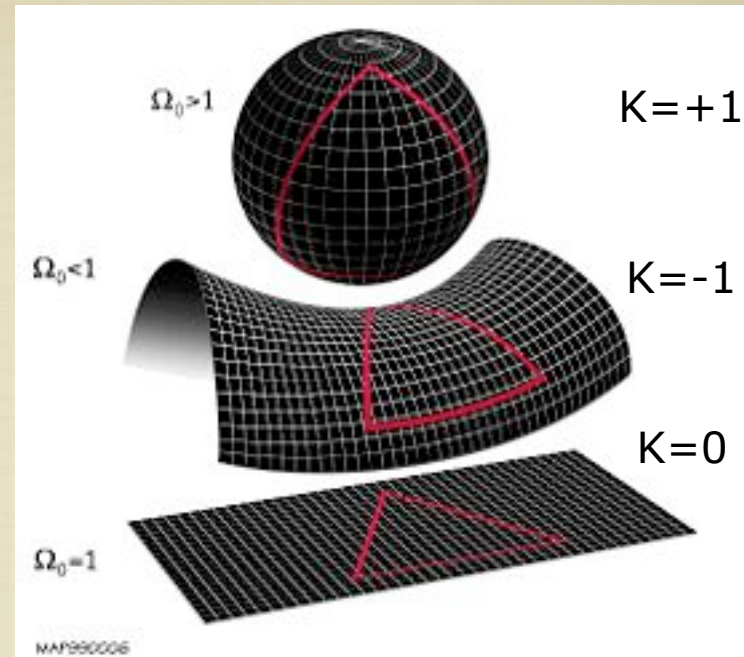
La densidad ρ determina la geometría del Universo
La densidad crítica corresponde al valor en el que
la geometría del espacio es plana

Densidad crítica y evolución del Universo

En ausencia de energía oscura:

- Densidad sub-crítica: Universo cerrado que colapsa
- Densidad super-crítica: Universo abierto en eterna expansión (decelerada)
- Densidad crítica: Universo plano en eterna expansión

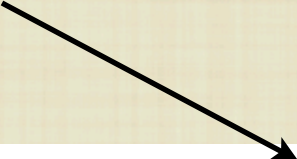
(Advertencia: esta conclusión se modifica en presencia de energía oscura, ver charla 4)



Einstein buscó soluciones que describieran un Universo estático y eterno

Pero sus propias ecuaciones no admitían soluciones estáticas

Propuso una modificación de las ecuaciones, añadiendo un término denominado '**constante cosmológica**'


$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - \frac{Kc^2}{a^2}$$

Interpretación:

- Densidad de energía del vacío
- Constante en el espacio y el tiempo
- Genera una repulsión que se opone a la atracción gravitacional

La determinación del modelo teórico correcto para la estructura del Universo se convirtió en una cuestión experimental



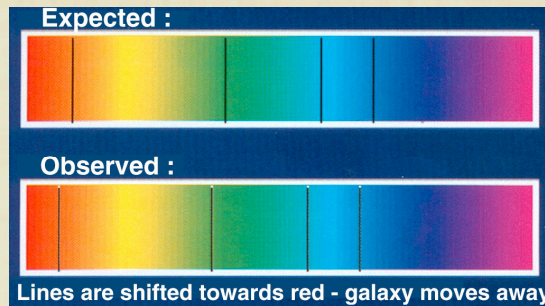
Expansión cosmológica

Hubble observó que la velocidad de las galaxias aumenta linealmente con la distancia

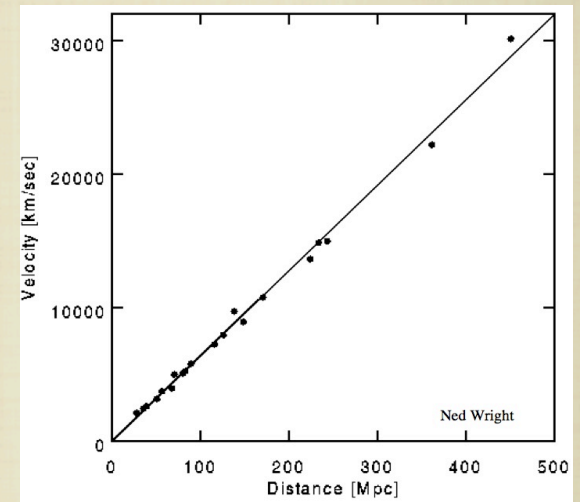
Explicable en el modelo de expansión de Friedmann
El Universo es como un globo que se infla, de modo que la velocidad de separación entre dos puntos cualesquiera aumenta con la distancia entre ellos



E. Hubble en el telescopio de Mt. Palomar



Corrimiento Doppler al rojo en el espectro de galaxias lejanas



La velocidad de recesión de las galaxias aumenta con la distancia

Einstein abandona la idea del Universo estático: **¡El Universo está en expansión!**
(hoy sabemos que la constante cosmológica podría explicar la energía oscura, de forma consistente con la expansión cosmológica, ver charla 4)



Modelo del Big Bang:



G. Gamov

- El Universo comenzó comprimido y a altísima temperatura hace unos 13.000.000.000 de años ("huevo primigenio", Lemaitre 1930)
- A partir de ese estado, empezó a expandirse y enfriarse

En las primeras fases, era de la radiación (fotones). Posteriormente aparecen las partículas (protones, neutrones, electrones). Con el progresivo enfriamiento se formaron núcleos, átomos, etc hasta finalmente estructuras astronómicas (estrellas, galaxias)

Predicciones claras y correctas:

• Nucleosíntesis primordial:

- Formación de los núcleos ligeros en el rápido enfriamiento en los primeros minutos (buen acuerdo con datos observ.)

• Radiación de fondo de microondas:

- Radiación de cuerpo negro a $T \sim 5K$, que llena el Universo Remanente de la era de la radiación, corrida al rojo
- Detectada en 1965

iFascinante nueva visión del Universo!

